

# Trabajo Fin de Grado. Física

Modelado y simulación de un sistema de  
control solar pasivo en dobles  
acristalamientos.

Autor

Raúl Alcain Ruiz

Director

Enrique Carretero Chamarro

Ponente

Jesús Subías Domingo



# Índice

## Resumen

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Sistema de referencia. Posición relativa del Sol.....	2
1.2 Cálculo posición del Sol.....	2
<b>2. Diseño.....</b>	<b>3</b>
2.1 Relación Cámara/Franja.....	3
2.2 Desfase por latitud.....	5
<b>3. Simulaciones.....</b>	<b>6</b>
3.1 Acristalamiento Fachada Sur.....	7
3.1.1 Observaciones acristalamiento Fachada Sur.....	10
3.2 Acristalamiento Fachada Sur-Oeste.....	12
3.2.1 Cálculo acristalamiento Fachada Sur-Oeste.....	13
3.3 Acristalamiento en Cubierta inclinada Sur.....	15
3.3.1 Cálculo acristalamiento Cubierta inclinada Sur.....	15
3.3.2 Simulación acristalamiento Cubierta inclinada Sur.....	16
3.3.3 Corrección ángulo inclinación Cubierta Sur.....	18
3.4 Cálculo espectral Transmitancia y Reflectancia global.....	21
<b>4. Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>24</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>25</b>



## Resumen

Con el objeto de reducir la radiación solar absorbida por las zonas acristaladas en la edificación, los vidrios en las zonas acristaladas incluyen un recubrimiento interferencial en capa fina bajo emisivo. Este tratamiento también limita la captación solar en invierno, cuando energéticamente nos resulta favorable. Esta propuesta pretende adaptar el porcentaje de la utilización de este recubrimiento a las necesidades estacionales, introduciendo geométricamente como variable la ***altura solar***. Para este fin, y teniendo en cuenta que un doble acristalamiento estándar se compone de dos vidrios con una cámara de aire intermedia. Se aplica el recubrimiento por franjas en cada uno de los dos vidrios, y se adapta el patrón para maximizar la captación en invierno y minimizarla en verano. Con esto, deberíamos pasar de una aplicación de nuestro recubrimiento en un 100% de la superficie acristalada en verano, a un 50% de la superficie acristalada en invierno.



# 1. Introducción.

A lo largo de la historia, el hombre ha intentado aprovechar el aporte energético de la radiación solar a la hora de abrir huecos en sus edificaciones, tanto el aporte de calor en el rango del infrarrojo como la iluminación que nos proporciona el rango visible. Es una cantidad enorme de energía que se reparte de forma inhomogénea e indiscriminada a lo largo de la superficie terrestre. Esta inhomogeneidad viene dada por dos parámetros, la **latitud geográfica** del lugar a estudiar y la **inclinación del eje terrestre** respecto a la radiación solar.

Tan importante como aprovecharla en momentos del año con necesidades calefactoras, sobre todo situados en zonas septentrionales, es anular su pertinaz irradiación en momentos de exceso de temperatura, especialmente en zonas meridionales.

Este control pasivo se viene dando a lo largo de la historia de la construcción mediante una buena orientación de la edificación y elementos que producen sombra, como los aleros en las ventanas. Sencillas soluciones geométricas.

Con el avance tecnológico se han implementado nuevas soluciones técnicas más complejas, nos vamos a referir a dos en concreto.

La utilización del **doble acristalamiento** (incluso triple) con cámara intermedia, para mejorar el aislamiento, tanto térmico como acústico<sup>1</sup>.

El tratamiento de los **vidrios con control solar** para discriminar la entrada de radiación en función de su longitud de onda<sup>2</sup>.

La idea a desarrollar en este trabajo es una combinación de estas dos soluciones para generar un mayor control solar mediante sencillos cálculos geométricos.

Sobre cada uno de los vidrios se procederá a aplicar el recubrimiento en capas, habiendo calculado la disposición óptima de las franjas para cada una de las orientaciones a estudiar. Primero un acristalamiento orientado al sur, otro al oeste, y una claraboya en una cubierta. Se simulará la intensidad que atraviesa nuestro recubrimiento a lo largo del año, analizando los resultados obtenidos para comprobar su eficacia.

---

<sup>1</sup> Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico HR. Protección frente al ruido.

<sup>2</sup> "Factor solar" CTE. Documento Básico HE. Ahorro de energía.

## 1.1 Sistema de referencia. Posición relativa del Sol.

Contamos con dos sistemas estandarizados para expresar la posición solar. Las coordenadas ecuatoriales, donde se proyectan los polos geográficos y el ecuador terrestre sobre la esfera celeste, y se define por la *declinación* y el *ángulo horario*. Y las **coordenadas horizontales**, que vamos a utilizar durante todo el proyecto.

El sistema de coordenadas horizontales utiliza como plano el horizonte local del observador. Este sistema está fijado a la tierra, por lo que son los elementos los que se desplazan respecto al observador por medio de dos variables:

**Altura solar ( $h$ ):** Angulo que forma el rayo solar con el plano del horizonte, desde 0 grados al amanecer y anochecer, hasta alcanzar su valor máximo al mediodía.

**Azimut ( $A$ ):** Desplazamiento del plano vertical que contiene al Sol con relación a su posición al mediodía (sur) sobre el plano del horizonte. Consideramos ángulos positivos por la mañana y negativos por la tarde.

Para todos los cálculos vamos a considerar la **hora solar**, nunca la hora local. De igual forma ignoraremos las alteraciones debidas a las irregularidades del movimiento de la tierra<sup>3</sup>.

## 1.2 Cálculo posición del Sol.

A continuación, procedemos a calcular el Azimut y la Altura solar a partir del día del año y la hora:

En primer lugar, procedemos a convertir la hora solar a un **ángulo horario**, aproximando cada hora a 15 grados ( $360^\circ=24h$ ):

$\omega = 15 * (H - 12)$  Siendo  **$H$**  la hora solar (0 a 24h), y  **$\omega$**  el ángulo horario, negativo por la mañana y positivo por la tarde. Coincidiendo por ejemplo las 6:00 a.m. con  $-90^\circ$ , y las 18:00 con  $+90^\circ$ .

A continuación, procedemos a calcular la **declinación solar**<sup>4</sup>, mediante la fórmula:

$$\delta = 23.45 \left( \frac{360}{365} * (284 + N) \right) \quad (1)$$

Siendo  **$N$**  el día del año objeto de nuestro cálculo, del 1 (1 de enero) al 365 (31 de diciembre).

---

<sup>3</sup> Ecuación del tiempo, Spencer (1971)

<sup>4</sup> González, F. N. (2004). *Arquitectura Bioclimática*. Madrid: Munilla-Lería. Capitulo 2.2.



A partir de la Latitud ( $L$ ), la hora solar ( $\omega$ ) y la declinación ( $\delta$ ) procedemos a calcular la **altura solar**<sup>5</sup> mediante la expresión:

$$h = \arcsen(\sen L * \sen \delta + \cos L * \cos \delta * \cos \omega) \quad (2)$$

Con todos los datos podemos proceder a calcular el **azimut** del Sol mediante la fórmula:

$$A = \arccos\left(\frac{\cos \delta * \cos \omega - \sin h * \cos L}{\cos h * \sin L}\right) \quad (3)$$

Estas dos variables, **altura solar** y **azimut**, nos servirán más adelante para definir los parámetros de la simulación.

## 2. Diseño.

Partimos de una configuración básica de dos vidrios de espesor 4mm con una cámara de aire de espesor  $a$  entre ellos. Nuestro objetivo es aplicar un recubrimiento de control solar a base de franjas horizontales de anchura  $b$  en cada uno de los vidrios. Mediante la combinación de estas franjas con la altura del sol, optimizar una máxima superficie de *sombra* (paso de la radiación solar a través del vidrio recubierto) en verano, con una mínima superficie de *sombra* en invierno.

El recubrimiento se realiza en la parte interior de los vidrios que da a la cámara de aire por motivos de durabilidad, al ser una zona protegida ante el desgaste por el uso y las inclemencias del clima.

Debido a esto, podemos despreciar el espesor de los vidrios a la hora de calcular la superposición de ambas *sombras*, pudiendo ignorar el cambio de índice de refracción al pasar del aire al vidrio.

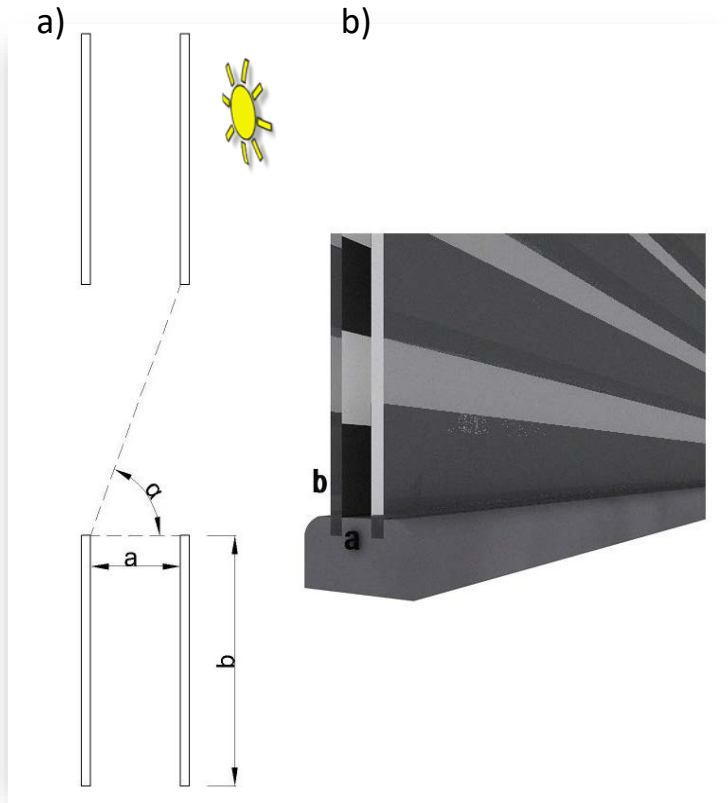
### 2.1 Relación Cámara/Franja.

En el modelo más sencillo mostrado en la *Figura 1*, partimos de una cámara entre los vidrios de espesor  $a$ , y de una anchura de franja y espaciado interfranja de dimensiones  $b$ . A partir de la geometría obtenemos las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ b &= \frac{a \sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} \quad (4) \end{aligned}$$

---

<sup>5</sup> González, F. N. (2004). *Arquitectura Bioclimática*. Madrid: Munilla-Lería. Capitulo 2.2.



**Fig. 1:** Primera aproximación al modelo. a) Esquema cálculo relación franjas/cámara. b) Modelo de acristalamiento.

conseguimos que entre las franjas de los dos cristales *sombreen* totalmente la radiación incidente.

Por tanto, aplicando estas condiciones a la ecuación (4) podemos calcular la relación entre el espesor de la cámara de aire y las franjas para un ángulo de  $47^\circ$  (solsticio de verano en el círculo polar ártico).

$$\sin 47^\circ = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \Rightarrow b = \frac{0.73}{0.68} a \Rightarrow b = 1.072a \quad (5)$$

Con esta relación entre  $a$  y  $b$ , en el equinoccio de verano la sombra de la lámina exterior comienza al finalizar la sombra de la lámina interior.

Los anteriores cálculos son aplicables en el círculo polar ártico, de latitud  $66^\circ 33' 46'' N$ , donde en el solsticio de invierno los rayos solares inciden con  $\alpha=0$ . Dado que su utilidad en esta latitud es muy discutible procederemos con los cálculos para cualquier otra latitud.

Siendo  $\alpha$  el ángulo representado en la *Figura 1*.

Realizamos los cálculos para una fachada en el hemisferio norte, siendo completamente extrapolables al hemisferio sur por simetría.

Sabiendo que la declinación en ambos solsticios es aproximadamente  $+23.5^\circ$  y  $-23.5^\circ$ , el recorrido solar total se da a lo largo de 6 meses, entre el solsticio de verano (21 junio) y el solsticio de invierno (21 diciembre). Y será de aproximadamente  $47^\circ$ .

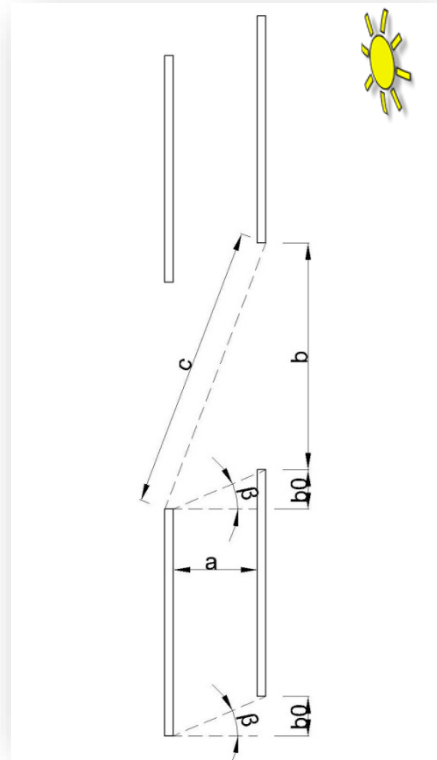
Por lo tanto, podemos aplicar las siguientes **condiciones de contorno** (en el círculo polar ártico): En el solsticio de invierno  $\alpha=0^\circ$ , con lo que las franjas de ambos cristales se superponen, permitiendo el máximo paso de radiación solar (50%), mientras que en el solsticio de verano  $\alpha=47^\circ$ ,

## 2.2 Desfase por la latitud.

Para cualquier otra latitud existirá un desfase entre las franjas de un vidrio y otro. En el caso más general:

$$\beta = \varphi_P - \varphi \quad (6)$$

Siendo  $\varphi$  la latitud geográfica del cálculo, y  $\varphi_P$  la latitud del círculo polar ártico, y  $\beta$  el ángulo representado en la *Figura 2*. Aplicando estos datos a la ecuación (4):



**Fig.2:** Aplicación del desfase y corrección por latitud.

$$\sin(\varphi_P - \varphi) = \frac{b_0}{\sqrt{a^2 + b_0^2}}$$

$$\Rightarrow b_0 = \frac{a \sin(\varphi_P - \varphi)}{\sqrt{1 - \sin^2(\varphi_P - \varphi)}} \quad (7)$$

El cálculo del desfase  $b_0$  nos obliga a recalcular la ecuación original (1), dado que el cambio del cateto afecta a la hipotenusa (*Figura. 2*).

$$\sin(\beta + 47^\circ) = \frac{b + b_0}{\sqrt{a^2 + (b + b_0)^2}} \quad (8)$$

Quedando las dos expresiones generales (4) como se muestra a continuación:

$$\sin(\varphi_P - \varphi + 47^\circ) = \frac{b + b_0}{\sqrt{a^2 + (b + b_0)^2}} \quad (9)$$

$$b_0 = \frac{a \sin(\varphi_P - \varphi)}{\sqrt{1 - \sin^2(\varphi_P - \varphi)}} \quad (10)$$

Aplicándola a la latitud de la ciudad de Zaragoza ( $\varphi=41^\circ39'22'' N$ ) nos queda una ecuación de segundo grado a resolver:

$$0.09b^2 + 0.09b_0^2 + 0.18bb_0 = 0.91a^2$$

Aplicándolo la ecuación (10) a la latitud de Zaragoza obtenemos una relación  $b_0 = 0.467a$

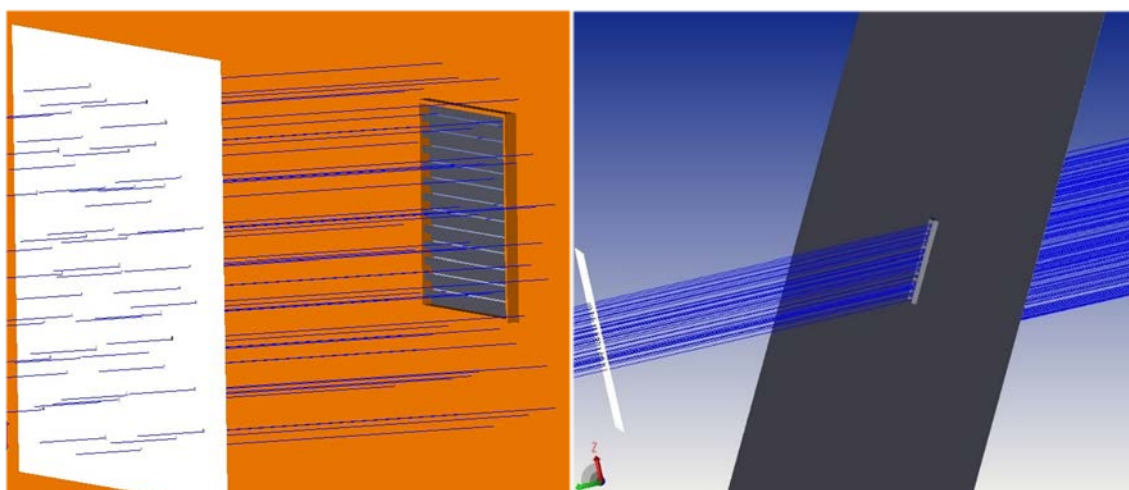
La ecuación de segundo grado nos proporciona dos soluciones, una de ellas negativa, que descartamos. Así, la relación entre la cámara  $a$  y la franja  $b$ :  $b = 2.7a$

Especificando este resultado para una cámara de  $a=10$  mm obtenemos unas franjas de 27 mm de anchura, con un desfase de 4.6 mm entre las franjas de uno y otro vidrio.

### 3. Simulaciones.

Una vez realizado el modelo virtual con un software 3D, lo introducimos en el programa de análisis de diseño óptico *Zemax OpticStudio 15*<sup>®</sup>.

Este programa realiza un trazado de rayos desde un emisor o fuente, hasta un receptor donde inciden normalmente. Colocamos entre ellos nuestro modelo de franjas, medimos su eficacia para cada posición del Sol.



*Fig.3: Simulación con el modelo en Zemax OpticStudio 15<sup>®</sup>.*

Para ello calculamos la posición del sol: Altura solar y Azimut para la ciudad de Zaragoza mediante los cálculos indicados en el punto 1.2.

Fecha/Hora	Altura solar (°)				
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
21-dic.	4.50	19.23	24.92	19.23	4.50
21-ene.	7.02	22.27	28.23	22.27	7.02
21-feb.	13.72	30.37	37.14	30.37	13.72
20-mar.	21.65	39.98	47.96	39.98	21.65
20-abr.	29.96	50.13	59.95	50.13	29.96
20-may.	35.42	56.77	68.50	56.77	35.42
20-jun.	37.39	59.11	71.82	59.11	37.39

*Tabla 1: Altura solar en grados para la ciudad de Zaragoza en los momentos indicados.*

<i>Fecha/Hora</i>	<i>Azimut (°)</i>				
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
<b>21-dic.</b>	52.8	29.1	0	-29.1	-52.8
<b>21-ene.</b>	55.0	30.5	0	-30.5	-55.0
<b>21-feb.</b>	61.0	34.6	0	-34.6	-61.0
<b>20-mar.</b>	68.7	40.7	0	-40.7	-68.7
<b>20-abr.</b>	78.3	49.8	0	-49.8	-78.3
<b>20-may.</b>	86.2	58.9	0	-58.9	-86.2
<b>20-jun.</b>	89.5	63.3	0	-63.3	-89.5

**Tabla 2:** *Azimut en grados para la ciudad de Zaragoza en los momentos indicados.*

Lo aplicamos a nuestra simulación girando el modelo interpuesto entre emisor y receptor.

Para la simulación tomamos una fuente lumínica con intensidad constante, que solo se verá afectada por la inclinación respecto al plano incidente. Despreciamos la atenuación por el aumento de la longitud de atmosfera que debe atravesar la radiación incidente al no entrar perpendicular a la superficie terrestre (cenit al mediodía). Prestaremos atención a los porcentajes de radiación que atraviesa nuestra ventana con y sin control solar.

Todos los datos de potencia, están normalizados tomando la unidad como el momento de máxima entrada de radiación solar para cada caso.

Para ajustarnos al modelo teorico, simulamos que el recubrimiento es absorbente, definido como **A** en las gráficas, como en la *Figura 4*. Por tanto, la intensidad incidente atraviesa nuestro acristalamiento o es absorbida por las bandas del recubrimiento.

Si procuramos ser mas fieles al fenómeno físico, la intensidad que incide sobre el recubrimiento no sera absorbida por el mismo, sino que sera reflejada siguiendo las leyes de la reflexión especular<sup>6</sup>. Observamos la influencia de este echo en las intensidades definidas como **R** en las leyendas de las gráficas, como en la *Figura 4*.

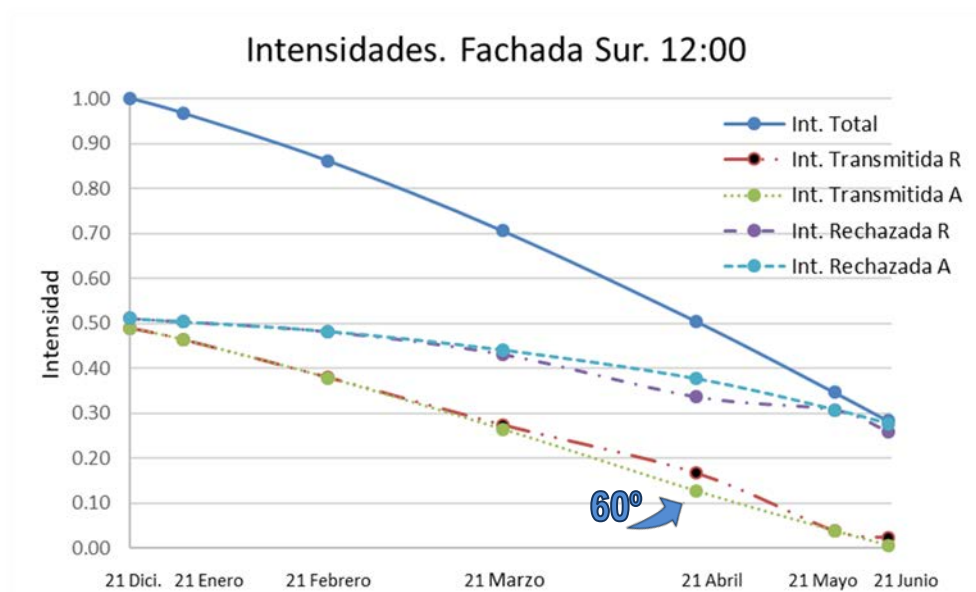
### 3.1 Acristalamiento Fachada Sur

Procedemos a realizar la simulación numérica con una fachada orientada al Sur, dado que es la orientación con mayor captación solar a lo largo del día. Realizamos los cálculos para cinco momentos del día, (8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00) para los días 21 de cada mes, desde el solsticio de invierno 21 de diciembre, hasta el solsticio de verano, 21 de junio. Siendo simétrico de junio a diciembre.

En el eje de abscisas mostramos el angulo de incidencia respecto a la normal de la fachada, o altura solar, que será menor en invierno y mayor en verano. Puede resultar chocante la mayor irradiación solar en invierno, pero al tratarse de un paramento vertical con orientación sur, al

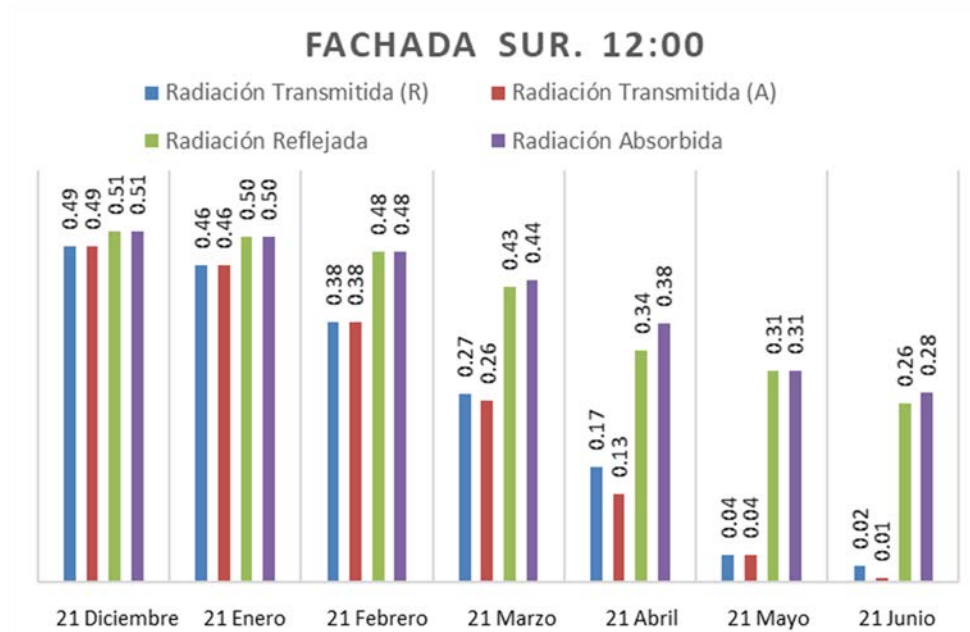
<sup>6</sup>Casas Peláez, Justiniano. Óptica. 7ª ed. Zaragoza, 1994. Cap.8. Reflexión y refracción en dieléctricos.

mediodía, la irradiación solo depende de la altura solar, ya que hemos despreciado efectos de atenuación de la atmósfera.



**Fig. 4:** Intensidades en una fachada orientada al sur a las 12 del mediodía desde diciembre a junio. Intensidad transmitida R y rechazada R con recubrimiento reflectante. Intensidad transmitida A y rechazada A con recubrimiento absorbente.

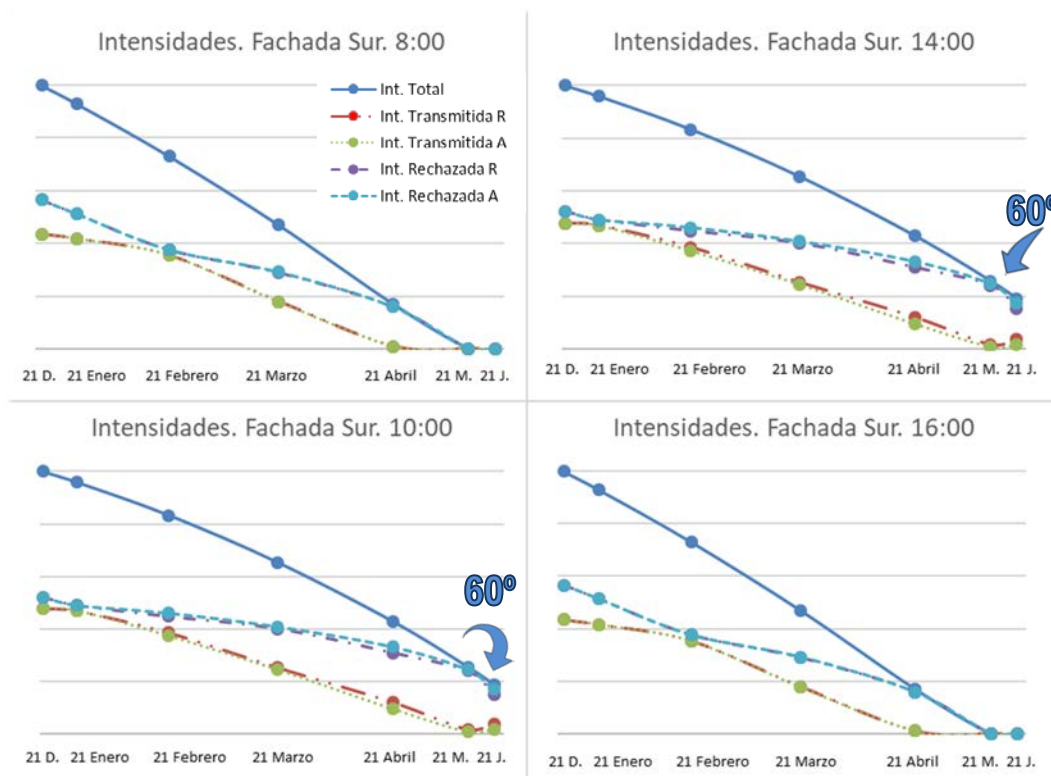
En la *Figura 4*, partimos de una *intensidad total* normalizada a la unidad en el momento de máxima intensidad, que se da en el solsticio de invierno. Representamos la *intensidad transmitida*, que atraviesa el acristalamiento sin interactuar con el recubrimiento. La *intensidad tratada* como aquella que se ve afectada por nuestro recubrimiento. La suma de ambas es la *intensidad total*.



**Fig. 5:** Fracciones de radiación solar que es transmitida con recubrimiento reflectante (R) y con recubrimiento absorbente (A), es reflejada, o absorbida en el doble acristalamiento, en una fachada orientada al sur, de diciembre a junio.

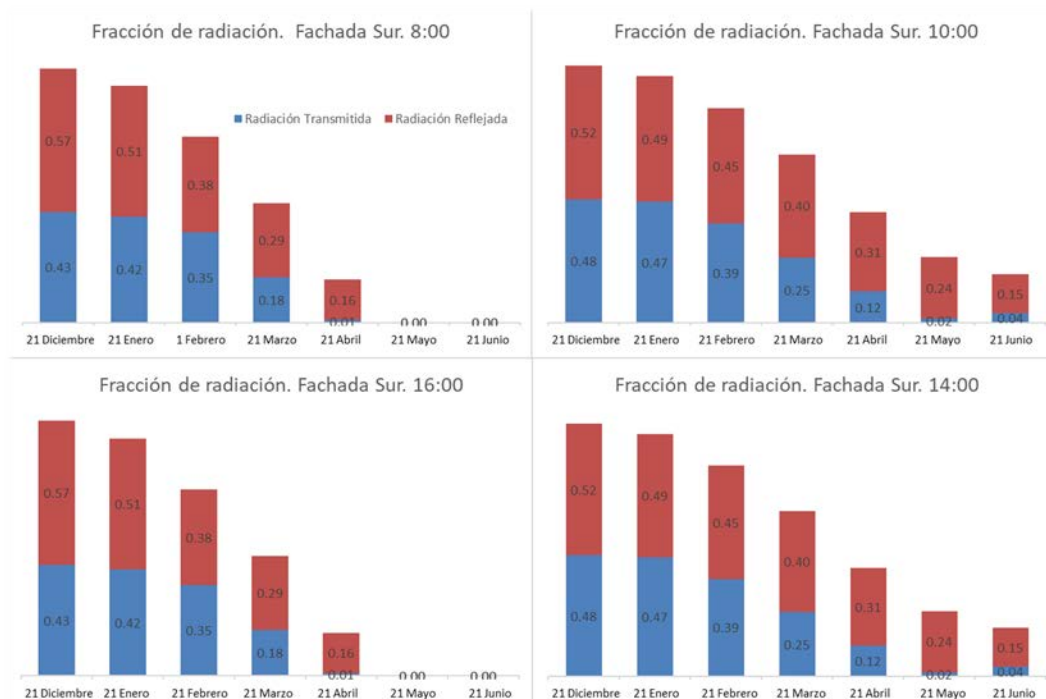
La *Figura 5* muestra los porcentajes de radiación que atraviesa nuestro doble acristalamiento en las mismas condiciones que el anterior. Siempre normalizando la unidad a la máxima intensidad de diciembre. En los gráficos porcentuales siempre tomaremos las bandas con el tratamiento de capa fina como reflectante, más cercano al comportamiento real. Pero dado que nuestro modelo está basado en una capa absorbente, mostramos en la *Figura 5* las pequeñas discrepancias en ambos casos.

A continuación, en la *Figura 6*, mostramos el comportamiento del modelo en las horas restantes a lo largo del día, 8, 10, 14 y 16, para los días 21 de cada mes, desde el solsticio de invierno 21 de diciembre, hasta el solsticio de verano, 21 de junio.



**Fig.6:** Intensidades en una fachada orientada al sur a las 8, 10, 14 y 16 horas desde diciembre a junio. Intensidad transmitida R y rechazada R con recubrimiento reflectante. Intensidad transmitida A y rechazada A con recubrimiento absorbente.

Observamos en primer lugar, la imposibilidad de medir radiación directa en la fachada sur a las ocho de la mañana y a las cuatro de la tarde, puesto que el sol, en época estival, al tener un recorrido que sobrepasa el arco de la semicircunferencia, se encuentra en el cuadrante noreste a primera hora de la mañana y en el cuadrante noroeste a partir de media tarde. Por tanto, esas medidas en los límites carecen de interés para este estudio.



**Fig. 7:** Fracción de radiación solar que atraviesan y es reflejada en el doble acristalamiento sin interactuar con ninguna de las capas metálicas, de diciembre a junio, para las horas estimadas.

Con la *Figura 7* completamos la visión general del funcionamiento a lo largo del día analizando las gráficas porcentuales para el modelo de bandas reflectantes.

### 3.1.1 Observaciones acristalamiento Fachada Sur.

Observamos que, aunque se aproxima al modelo teórico, en el modelo reflectante no pasa de un 50% en el solsticio de invierno al 0% en el solsticio de verano. Esto se debe a las dobles, incluso triples reflexiones en los diversos recubrimientos, que más adelante analizaremos.

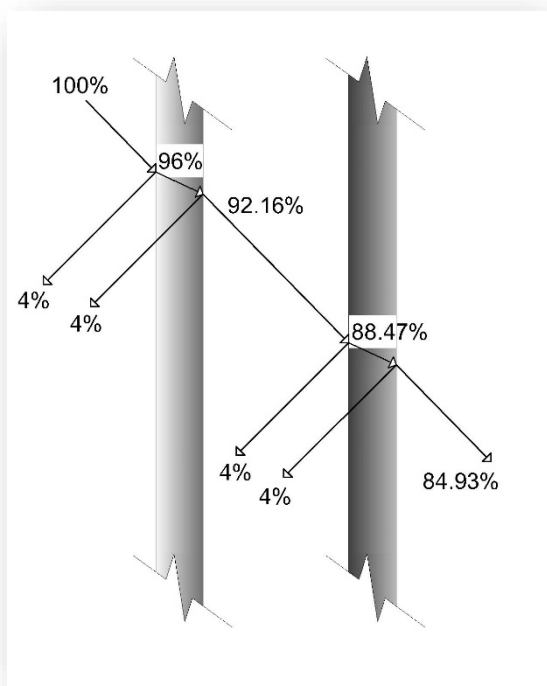
Otro fenómeno a tomar en consideración son las reflexiones existentes en los dos vidrios sin el tratamiento.

Considerando un vidrio estándar, ignorando las pequeñas refracciones por el cambio de medio, aplicando la fórmula para la reflexión<sup>7</sup> al pasar de un medio con índice  $n$  a un medio con índice  $n'$ :

$$R = \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 \quad (11)$$

<sup>7</sup> Casas Peláez, Justiniano. Óptica. 7ª ed. Zaragoza, 1994. Cap.8. Reflexión y refracción en dieléctricos.





**Fig. 8:** *Perdidas por reflexiones del haz incidente al atravesar los dos vidrios.*

Realizando los cálculos de un  $n=1$  del aire, a un  $n=1.5$  para el vidrio. Cada cambio de medio supone una reflexión de un 4% de la intensidad incidente. Con lo que podemos calcular una disminución de la transmitancia normal de 15.07% sobre la intensidad incidente al atravesar los dos vidrios, contando cuatro reflexiones, una en cada cara.

En todo momento vamos a despreciar el pequeño porcentaje de energía absorbida por los vidrios, alrededor del 1%.

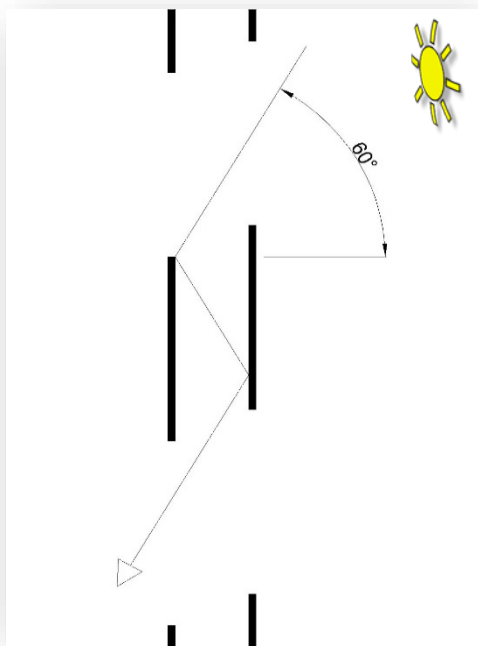
Tomando en cuenta estas consideraciones procedemos a realizar la simulación numérica incluyendo los dos vidrios. Comparamos los resultados con la simulación sin vidrios.

En la siguiente tabla, mostramos las intensidades totales y transmitidas a lo largo de nuestro intervalo temporal, normalizando sobre la intensidad total máxima (21 diciembre) en el modelo sin vidrios. Solamente tomando el modelo de franjas reflectantes, no el absorbente.

	<i>Sin vidrios</i>			<i>Con vidrios</i>		
	Int. Total (W)	Intensidad Transmitida	Porcentaje Transmitido	Int. Total (W)	Intensidad Transmitida	Porcentaje Transmitido
<b>21-dic.</b>	1.00	0.49	48.91%	0.85	0.42	49.15%
<b>21-ene.</b>	0.97	0.46	47.90%	0.82	0.40	48.29%
<b>21-feb.</b>	0.86	0.38	44.07%	0.73	0.33	45.01%
<b>20-mar.</b>	0.71	0.27	38.84%	0.59	0.24	40.52%
<b>20-abr.</b>	0.50	0.17	33.17%	0.39	0.14	36.23%
<b>20-may.</b>	0.35	0.04	11.20%	0.23	0.03	13.27%
<b>20-jun.</b>	0.28	0.02	8.09%	0.16	0.01	8.75%

**Tabla 3:** *Comparación simulación con y sin vidrios. Desde el 21 de diciembre hasta el 21 de junio.*

Según estos datos para la intensidad máxima total tenemos una atenuación por los dos vidrios del 15%, muy cercano al 15.07% que hemos aproximado en el cálculo anterior. Observamos que los porcentajes de la intensidad transmitida sobre la intensidad incidente, son similares para los dos modelos.



**Fig. 9:** Fenómeno de doble reflexión entre franjas.

Cabe destacar la pérdida de efectividad en el equinoccio de verano tanto antes como después del mediodía. Que como vemos en la *Figura 6*, solo ocurre cuando tomamos el recubrimiento metálico como reflejante y no al simplificarlo como absorbente.

Este es el mismo fenómeno que nos encontramos a finales de abril en la *Figura 4*, y que suponen una pérdida de efectividad del modelo alrededor de los 60°.

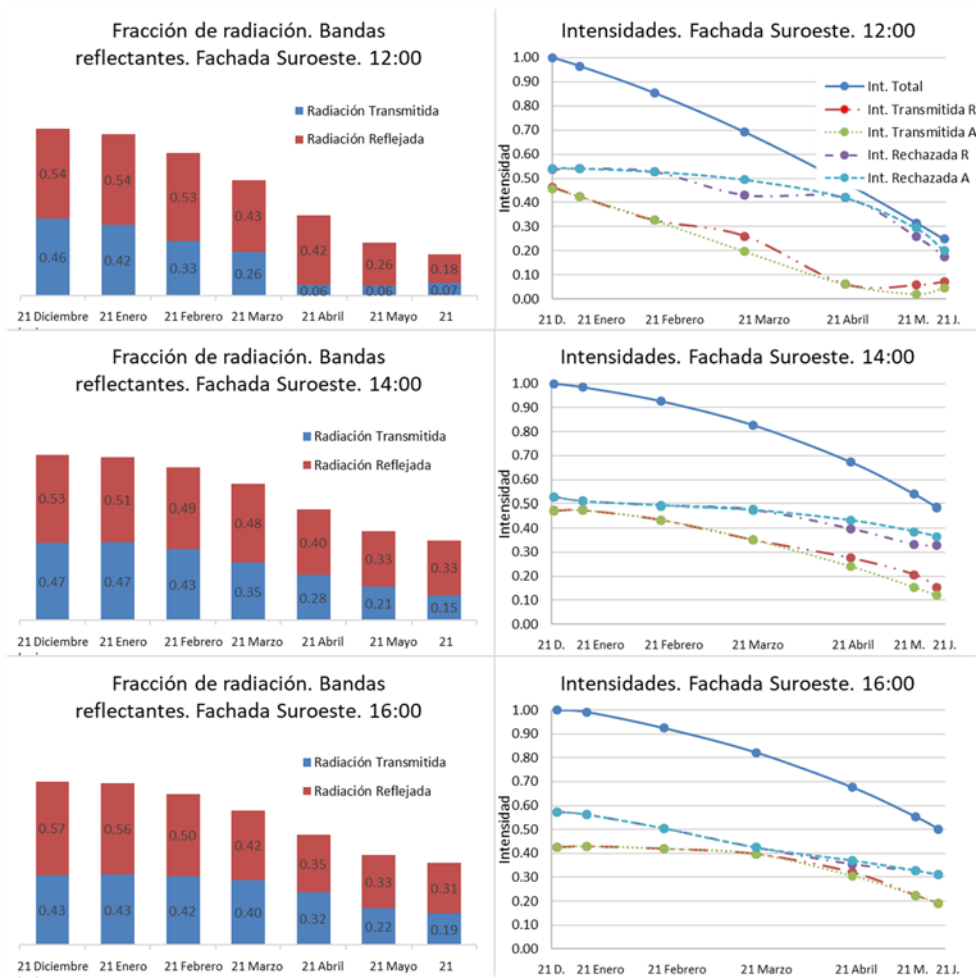
En el 21 de junio a las diez de la mañana y las dos de la tarde, la altitud del sol es de unos 60° sobre el horizonte. En la *Figura 9* observamos el fenómeno de doble reflexión que se está dando entre las capas metálicas de los dos vidrios, con lo cual estamos detectando un incremento de radiación que en principio debería haber sido reflejada.

## 3.2 Acristalamiento Fachada Sur-Oeste

A diferencia de la orientación sur ya estudiada, las orientaciones al este y al oeste reciben más radiación en verano que en invierno, y se distribuye más proporcionalmente a lo largo del año, por lo que van a ser apropiadas para este estudio. En particular la orientación suroeste es más conflictiva, dado que recibe gran cantidad de radiación a partir del mediodía solar, y en época estival la temperatura ambiente ya ha subido de forma considerable<sup>8</sup>, por lo que las condiciones de temperatura exteriores son más desfavorables. Los huecos acristalados con esta orientación demandan protección frente al verano, sin embargo, dada la menor altura solar, las protecciones horizontales como aleros y pérgolas son poco efectivas.

En la *Figura 10* procedemos a comprobar el comportamiento del diseño anterior, calculado para una orientación sur, aplicado a una orientación suroeste, a las 12 del mediodía, 2 y 4 de la tarde.

<sup>8</sup> CTE. Documento Básico HE-1. Limitación de la demanda energética. Apéndice D2. Parámetros característicos de la envolvente.



**Fig. 10:** Intensidades y porcentajes para una fachada suroeste, aplicando los parámetros calculados para una fachada sur, para las horas de tarde, desde diciembre a junio. Intensidad transmitida R y rechazada R con recubrimiento reflectante, transmitida A y rechazada A con recubrimiento absorbente.

A continuación, realizamos los cálculos para una distribución idónea a una fachada suroeste, esto es, rotada 45° sobre la fachada sur, y para la hora que estimamos de máxima incidencia con esta nueva geometría, las 14 horas.

En esta ocasión, al no estar fijados en el mediodía solar, el azimut no permanece fijo, por lo que el sol realizara un movimiento en diagonal (azimut y altura solar). Este hecho no nos influirá en el cálculo de las proporciones de las franjas, dado que podemos simplificar nuestras coordenadas esféricas (azimut y altura solar) a polares, en un plano referente a la altura solar.

### 3.2.1 Cálculo acristalamiento Fachada Sur-oeste:

Conociendo que la altura solar en el solsticio de invierno a las 14 horas es 19.23°. Podemos aplicarlo a la ecuación (4), y recalculer el desfase entre franjas  $b_0$  (recordar Figura 2)

$$\sin(19.23^\circ) = \frac{b_0}{\sqrt{a^2 + b_0^2}} \Rightarrow b_0 = \frac{a \sin(19.23^\circ)}{\sqrt{1 - \sin^2(19.23^\circ)}} \quad (12)$$

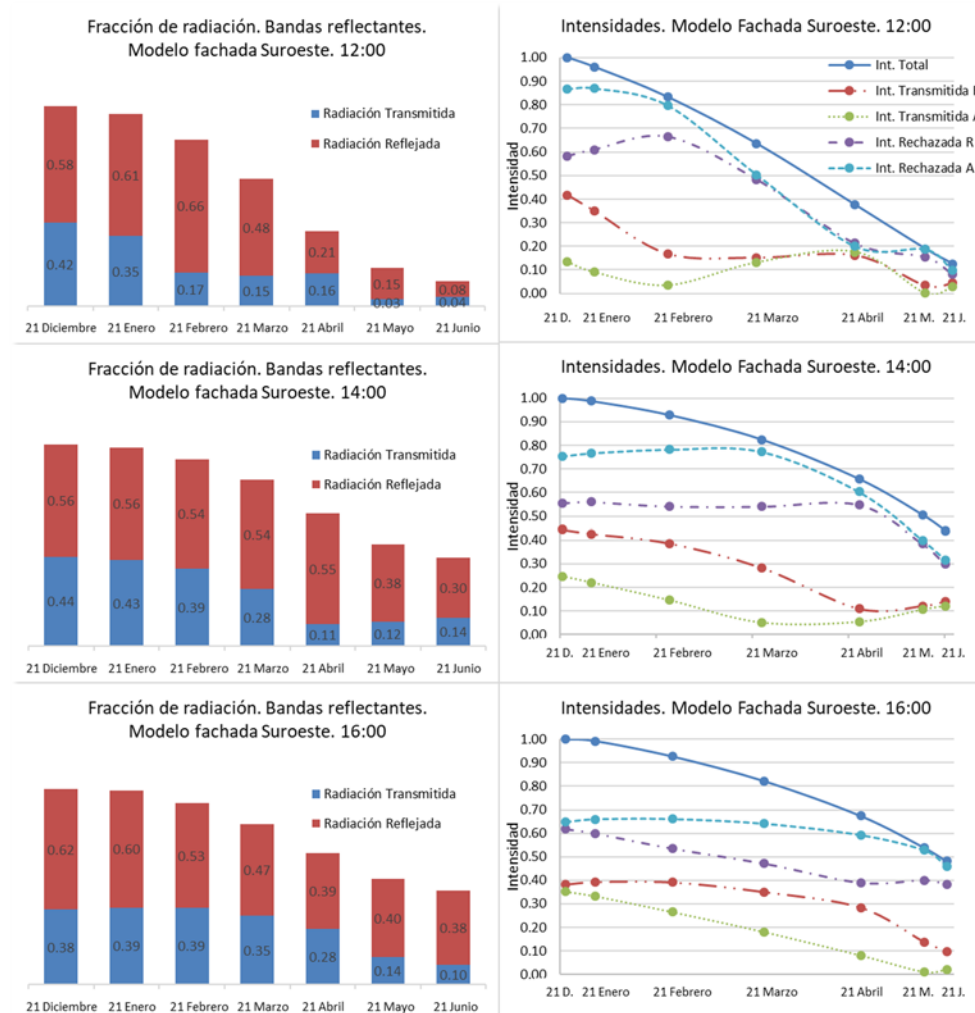
Obtenemos una relación  $b_{0(suroeste)} = 0.35 a$

A continuación, aplicamos la ecuación (9), sabiendo que la altura máxima en el solsticio de verano son  $59.11^\circ$

$$\sin(59.11^\circ) = \frac{b + b_0}{\sqrt{a^2 + (b + b_0)^2}} \quad (13)$$

Resolviendo con el  $b_{0(suroeste)}$  obtenemos una relación entre cámara y franja:  $b = 1.32a$

Con el nuevo diseño de franjas específico para una fachada suroeste a las 14 horas, procedemos a realizar la simulación a las 12, 14 y 16 horas, para los días 21 de cada mes. Desde el solsticio de invierno 21 de diciembre, hasta el solsticio de verano, 21 de junio. Presentamos los resultados en la *Figura 11*.



**Fig. 11:** Intensidades y porcentajes para el modelo de fachada suroeste, para las horas de tarde, desde diciembre a junio. Intensidad transmitida R y rechazada R con recubrimiento reflectante, transmitida A y rechazada A con recubrimiento absorbente.

Observamos grandes discrepancias en la actuación de nuestro modelo en las diferentes horas. A las 12 del mediodía conseguimos una buena proporción de intensidad rechazada una vez alcanzado el verano, aunque a finales de abril encontramos una importante pérdida de efectividad. Contrariamente, a las 14 horas sucede el caso opuesto, mejor funcionamiento a finales de abril, y pérdida de efectividad en el verano. A las 16 horas encontramos un funcionamiento que se aproxima más a el resultado esperado, menor efectividad en invierno, y mayor efectividad en verano. No apreciando grandes mejoras respecto a la utilización del modelo calculado para la orientación sur en una fachada sur-oeste.

Cabe destacar la gran discrepancia entre recubrimiento absorbente y reflectante, lo que limita mucho la aplicación del modelo sur-oeste en esta orientación.

### 3.3 Acristalamiento en Cubierta inclina Sur

Finalmente, donde encontramos mayor utilidad a este tamiz de control solar por franjas, seria en soluciones constructivas diseñadas para reducir la demanda energética. Tanto en captación directa con o sin lazo convectivo, mediante galerías acristaladas e invernaderos<sup>9</sup> adosados a las fachadas de edificios, como captación retardada mediante muros trombe<sup>12</sup>. Todas estas soluciones mejoran notablemente su funcionamiento cuando las cubiertas superiores también son acristalados.

Estas soluciones comunes en el norte de Europa, tienen un problema de implementación en climas con los veranos más duros, comunes en España. Esta facilidad para la captación hace que en verano se deban cubrir para evitar su funcionamiento pasivo.

#### 3.3.1 Cálculo acristalamiento Cubierta inclinada Sur

En un principio tomamos una inclinación de la cubierta acristalada de  $30^\circ$ , típica dentro de la normativa de edificación<sup>10</sup>. Conocemos del cálculo para la fachada sur que la altura solar en el solsticio de invierno a las 12 horas es  $24.92^\circ$ , restándole el complementario de los  $30^\circ$  de inclinación obtenemos  $-35.08^\circ$ , que será la altura del sol respecto a la normal de la cubierta en el solsticio de invierno.

Por otro lado, realizamos el mismo cálculo para el solsticio de verano con una altura solar de  $71.82^\circ$ , y obtenemos  $11.82^\circ$  de altura solar respecto a la normal de la cubierta.

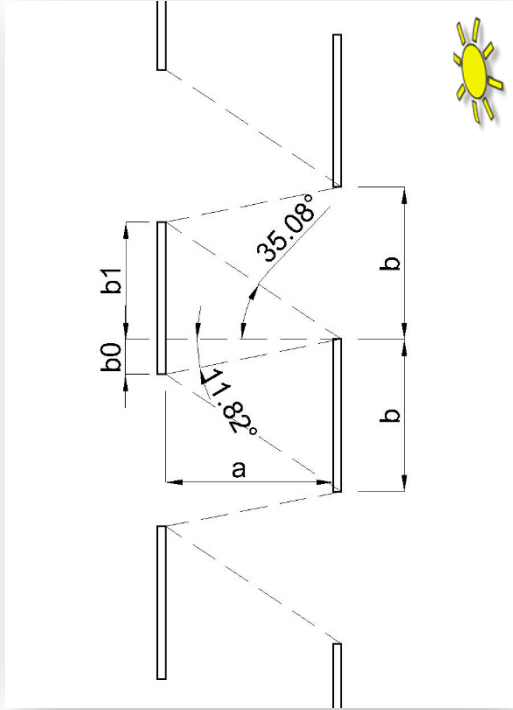
En la *Figura 12* vemos como con estos dos ángulos formamos una nueva figura para calcular la relación entre **b** y **a** mediante la ecuación (4):

---

<sup>9</sup> CTE. Documento Básico HE-1. Limitación de demanda energética. Terminología.

<sup>10</sup> CTE. Documento Básico HS-1. Protección frente a la humedad. Tabla 2.10 Pendientes de cubiertas inclinadas.

$$\sin(35.08^\circ) = \frac{b_1}{\sqrt{a^2 + b_1^2}} \rightarrow b_1 = \frac{a \sin(35.08^\circ)}{\sqrt{1 - \sin^2(35.08^\circ)}} \quad (14)$$



**Fig. 12:** Cálculo de geometría para cubierta inclinada.

Aplicamos este ángulo como primera condición de contorno, y recalculamos el desfase entre franjas exteriores e interiores  $b_1$ , que esta vez será negativo. Obtenemos una relación:

$$b_{1(cubierta)} = 0.702 a = 7.02 \text{ mm.}$$

A continuación, aplicamos la segunda condición de contorno:

$$\sin(11.82^\circ) = \frac{b_0}{\sqrt{a^2 + b_0^2}} \Rightarrow$$

$$b_0 = \frac{a \sin(11.82^\circ)}{\sqrt{1 - \sin^2(11.82^\circ)}} \quad (15)$$

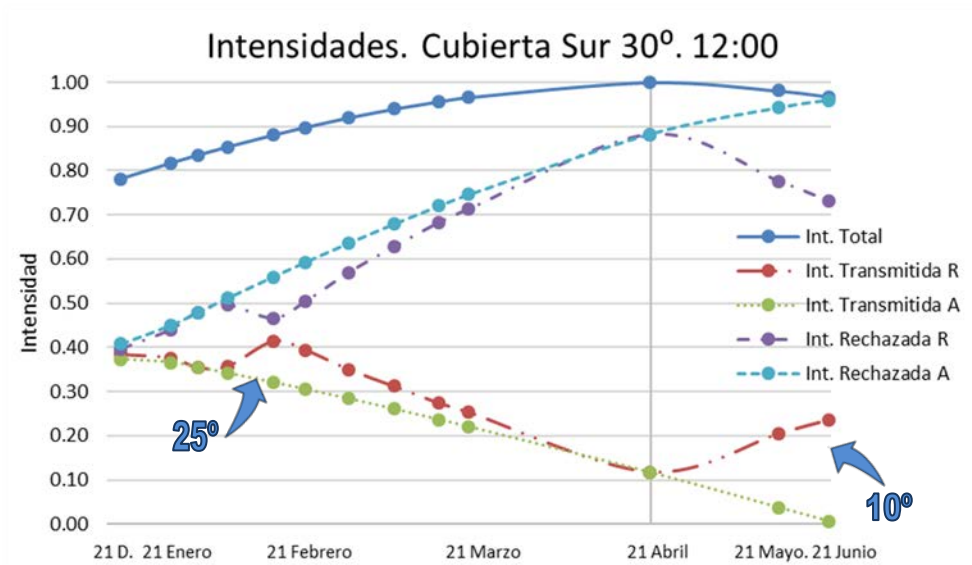
Obtenemos una relación  $b_{0(cubierta)} = 0.209 a = 2.09 \text{ mm.}$

Sumando ambas relaciones, obtenemos las anchuras de las franjas e interfranjas:

$$b_{(cubierta)} = 0.911 a = 9.11 \text{ mm.}$$

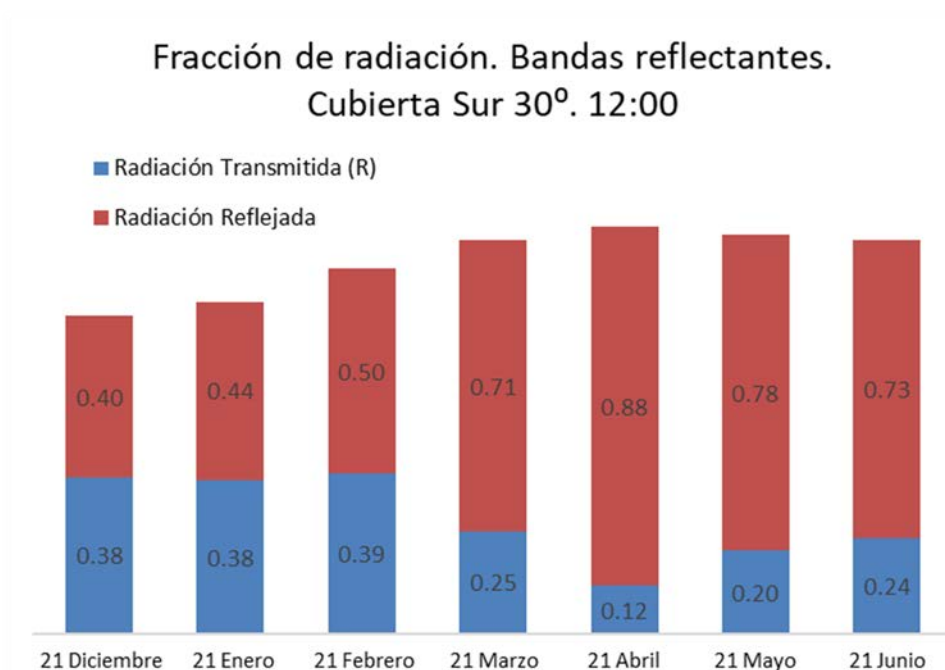
### 3.3.2 Simulación acristalamiento Cubierta inclinada Sur:

Con el nuevo diseño de franjas para cubiertas orientadas al sur, realizamos la simulación a las 12 horas, para los días 21 de cada mes. Desde el solsticio de invierno 21 de diciembre, hasta el solsticio de verano, 21 de junio. En la *Figura 13* detectamos una pérdida de efectividad a finales de febrero, por lo que ampliamos los puntos de muestreo en ese entorno.



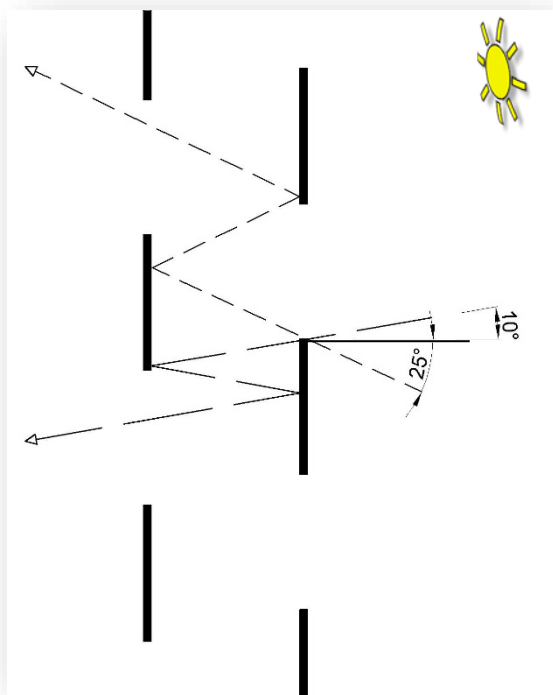
**Fig. 13:** Intensidades en una cubierta a 30° orientada al sur, a las 12 del mediodía desde diciembre a junio. Intensidad transmitida R y rechazada R con recubrimiento reflectante, transmitida A y rechazada A con recubrimiento absorbente.

A continuación, en la *Figura 14* presentamos los porcentajes de radiación que atraviesa el doble acristalamiento de la cubierta. De nuevo solo presentamos el modelo con las bandas reflectantes y normalizado para la máxima intensidad, que esta vez se dará el 21 de abril.



**Fig. 14:** Porcentajes radiación solar que atraviesan el doble acristalamiento sin interactuar con ninguna de las capas metálicas, a lo largo de las diferentes alturas solares.

En las *Figuras 13 y 14* observamos como la máxima irradiación no coincide con el equinoccio de verano, si se diera este hecho simplificaría mucho el diseño de las franjas.



**Fig. 15:** Fenómeno de doble reflexión en el modelo de cubierta.

Por otro lado, en las mismas figuras se da un descenso de efectividad entorno a los 25° (21 de febrero). En esta misma figura observamos una caída de efectividad desde los 0° (21 abril, normal con la cubierta) hasta los 10°.

Como vemos en la *Figura 15*, se trata de nuevo del fenómeno de doble reflexión. El primero (tomando todos los grados positivos) comienza descendiendo hasta los 25°, donde pasa de tres reflexiones a dos, poco después de pasar los 25° pasa a una sola reflexión, recuperando la efectividad.

El segundo descenso se da al sobrepasar los 0° hasta el cenit en el solsticio de verano, los trazados que se reflejan en la segunda cara acaban entrando mediante doble reflexión.

A partir de estos resultados, y dado que la inclinación de la cubierta es un grado de libertad, (siempre que cumplamos normativa<sup>11</sup>). Realizamos un diseño más sencillo donde ajustamos la pendiente de la cubierta para maximizar los efectos del control solar por franjas.

### 3.3.3 Corrección ángulo inclinación cubierta Sur

Procedemos a recalcular el modelo en una cubierta con una inclinación más adecuada a nuestras necesidades:

Siendo la máxima altura solar en Zaragoza de 71.82°, la cubierta deberá tener una inclinación de  $90^\circ - 71.82^\circ = 18.18^\circ$ .

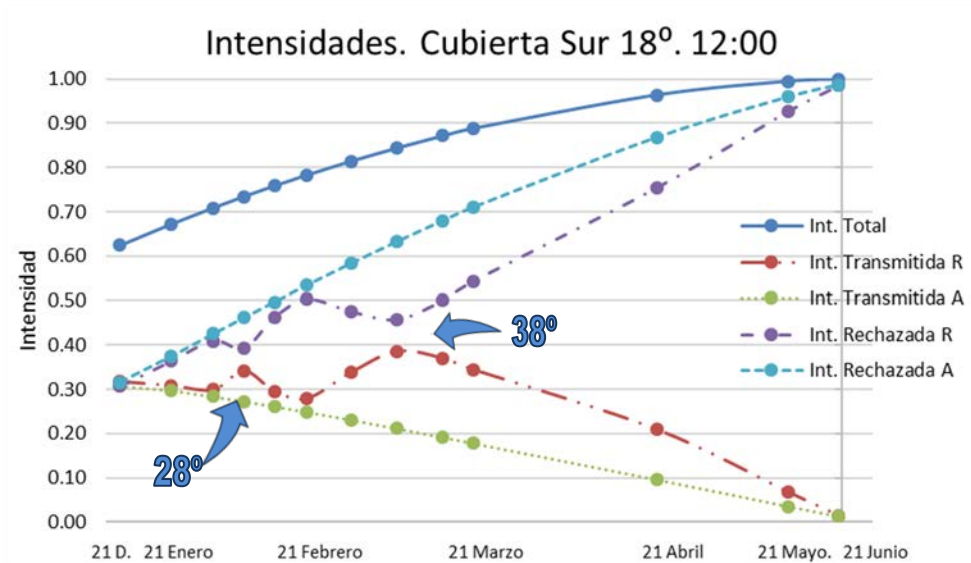
Hacemos coincidir el zenit de la altura solar en verano con la incidencia normal sobre la cubierta. Como hemos visto en el capítulo 2.1 el recorrido solar durante medio año es 47°, por tanto, para una cámara de 10 mm.

$$\sin(47^\circ) = \frac{10}{\sqrt{10^2 + b^2}} \Rightarrow b \simeq 10.72 \text{ mm.} \quad (16)$$

Aplicando esta nueva distribución de franjas realizamos de nuevo la simulación.

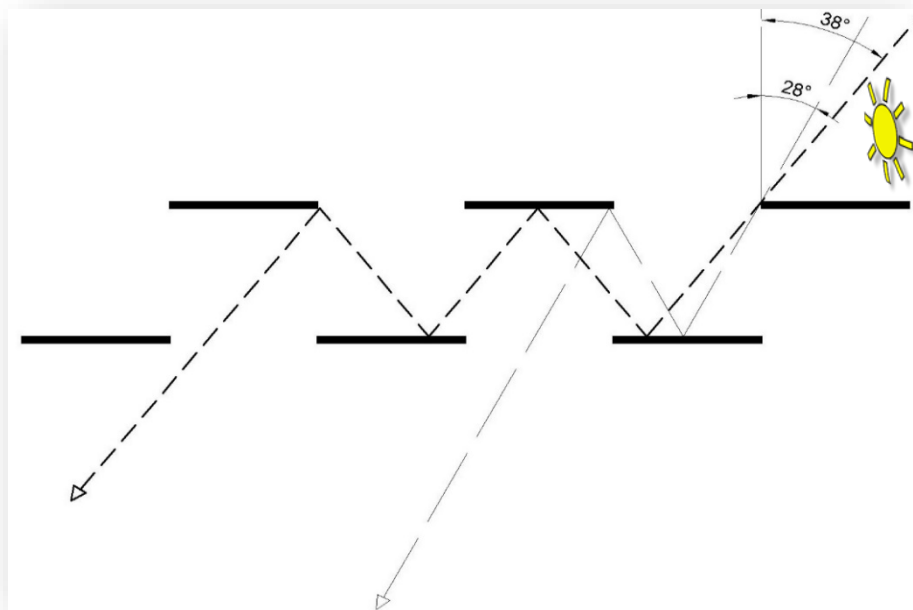
<sup>11</sup> CTE. Documento Básico HS-1. Protección frente a la humedad. Tabla 2.10 Pendientes de cubiertas inclinadas. (mínimo 17°)





**Fig. 16:** Intensidades en una cubierta a  $18.18^\circ$  orientada al sur a las 12 del mediodía desde diciembre a junio. Intensidad transmitida R y rechazada R con recubrimiento reflectante, transmitida A y rechazada A con recubrimiento absorbente.

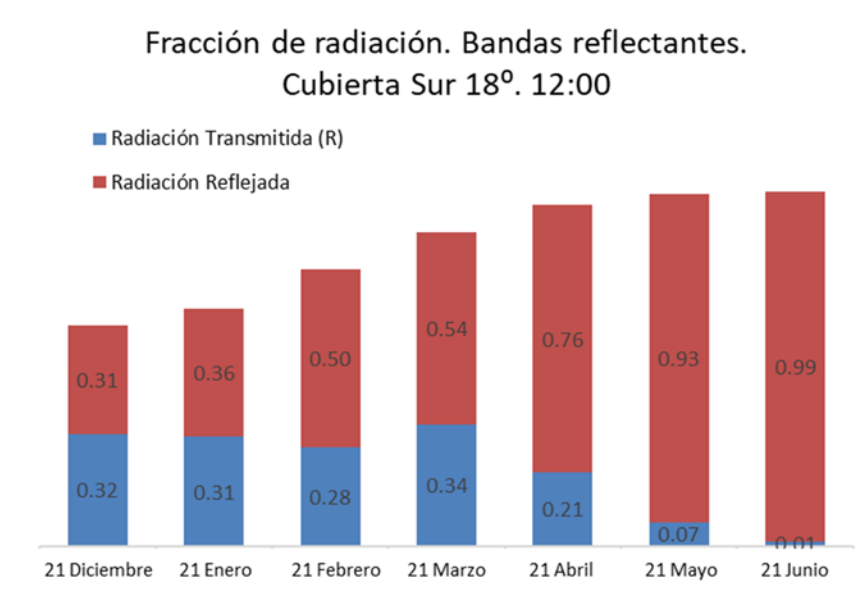
Observamos que teóricamente el funcionamiento debería ser óptimo. Como vemos en la *Figura 16* tenemos pérdidas de eficiencia entre enero y marzo (alrededor de los  $28^\circ$  y los  $38^\circ$ ). De nuevo analizamos el esquema de rayos:



**Fig. 17:** Fenómeno de doble y triple reflexión en el modelo de cubierta a  $18^\circ$ .

Como observamos en la *Figura 17*, en el entorno de los  $38^\circ$  se está produciendo un fenómeno de triple reflexión. En cambio, el fenómeno entorno a los  $28^\circ$  es de nuevo una doble refracción.

Por último, presentamos los porcentajes de radiación que atraviesa el doble acristalamiento de la cubierta con esta nueva inclinación. En la *Figura 18* presentamos el modelo con las bandas reflectantes y normalizado para la máxima intensidad, coincidiendo esta vez con el solsticio de veranos.



**Fig. 18:** *Porcentajes radiación solar que atraviesan el doble acristalamiento sin interactuar con ninguna de las capas metálicas, a lo largo de las diferentes alturas solares.*

Podemos concluir que el modelo consigue sus mejores resultados aplicando a cubiertas inclinadas con orientación sur. Que es la situación que más problemas podríamos tener con el exceso de insolación en verano. Y por tanto el caso más paradigmático de aplicación de nuestro modelo.

### 3.4 Cálculo espectral Transmitancia y Reflectancia global.

Pretendemos mejorar el modelo introduciendo la dependencia espectral de los diferentes elementos del sistema. Aproximando a la realidad el espectro luminoso de nuestra fuente, e imitando el comportamiento de nuestro modelo a un vidrio de control solar ya existentes en el mercado, el vidrio DAG70 de *Ariño Douglas*.

En el software de simulación *Zemax OpticStudio 15®* introducimos la dependencia espectral de la fuente (iluminante) y el vidrio, por medio de 24 valores discretos entre 300 nm y 2500 nm. Esta simplificación la realizamos a partir de los valores del espectro solar de la norma internacional ISO 9050.

Primero presentamos la transmitancia y reflectancia solar:

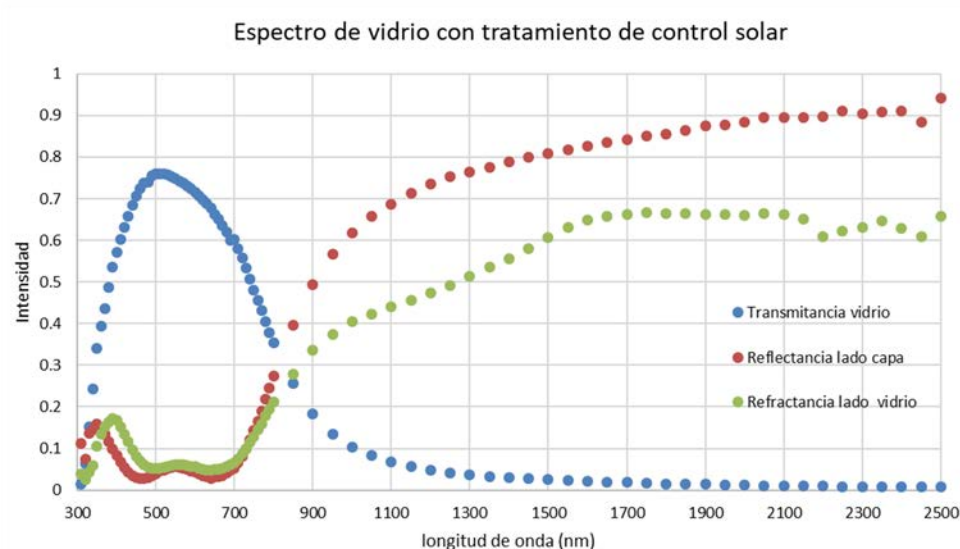
$$T_{solar} = \frac{\int_0^{\infty} T(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda} \quad ; \quad R_{solar} = \frac{\int_0^{\infty} R(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda} \quad (17)$$

El cálculo de la transmitancia y la reflectancia solar total de nuestro recubrimiento la realizamos integrando la transmitancia (o reflectancia) y el espectro solar  $S(\lambda)$ . Todo ello normalizado respecto a la integral del espectro solar  $S(\lambda)$ .

La transmitancia y reflectancia visible la calcularemos añadiendo a la integral la sensibilidad del ojo humano  $V(\lambda)$ , parámetro dependiente de la longitud de onda. Asimismo, tomaremos la parte visible del espectro solar (iluminante D65), y normalizaremos respecto al iluminante y a la sensibilidad del ojo humano.

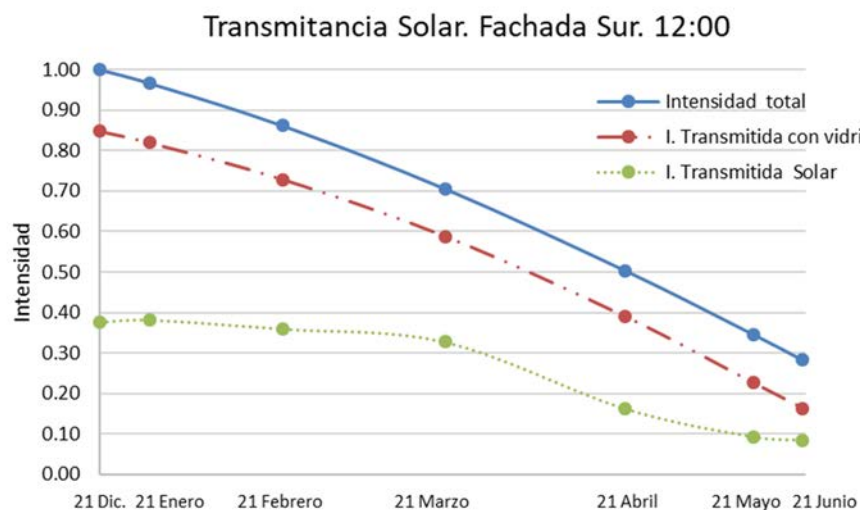
$$T_{vis} = \frac{\int_0^{\infty} T(\lambda)S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad ; \quad R_{vis} = \frac{\int_0^{\infty} R(\lambda)S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (18)$$

Experimentalmente, obtenemos los términos  $T(\lambda)$  y  $R(\lambda)$  midiendo con el espectrofotómetro el vidrio DAG70, con tratamiento de control solar de la casa *Ariño Douglas*. En la *Figura 19* mostramos la transmitancia de dicho vidrio, así como la reflectancia medida tanto en el lado del recubrimiento, como en el lado del vidrio. A partir de su caracterización, obtenemos los datos con los que construir un material para aplicar a las franjas en nuestro modelo en *Zemax OpticStudio 15®*, imitando las propiedades ópticas del vidrio analizado.



**Fig. 19:** Caracterización transmitancia, reflectancia desde el lado con acabado de recubrimiento y reflectancia desde el lado con acabado en vidrio, del vidrio DAG70.

Aplicamos esta nueva configuración al acristalamiento en fachada Sur del punto 3.1. En la *Figura 20*, partimos de una *intensidad total* normalizada a la unidad en el momento de máxima intensidad (imitando el espectro solar), en el solsticio de invierno. Representamos la *intensidad transmitida con vidrio*, como la que atraviesa el acristalamiento sin nuestro recubrimiento, y la intensidad del espectro solar que atraviesa nuestro vidrio con su recubrimiento, o lo que es lo mismo, la **transmitancia solar total**:

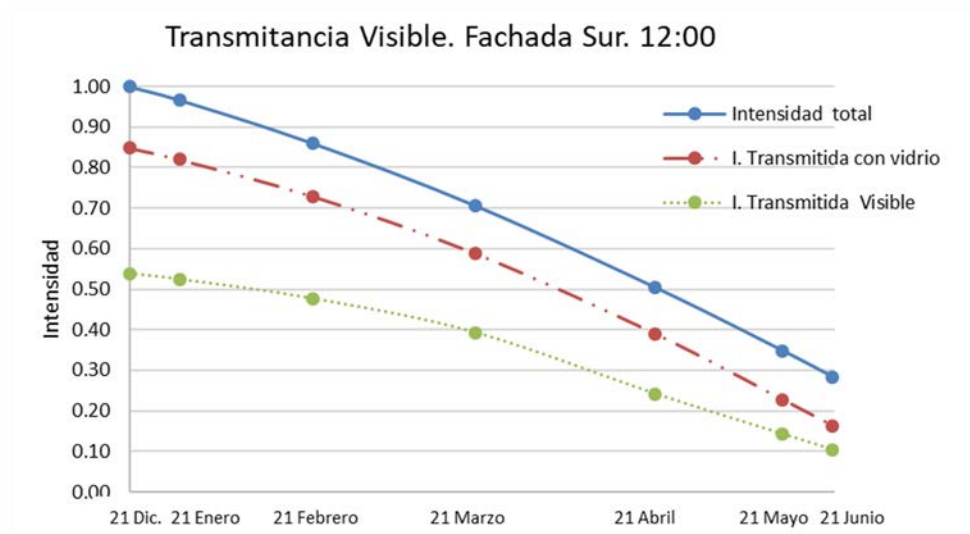


**Fig. 20:** Intensidades en una fachada orientada al sur a las 12 del mediodía desde diciembre a junio. **Transmitancia solar** implementando  $T(\lambda)$  y  $S(\lambda)$ .

Observamos que en la época invernal, siendo la incidencia de la radiación sobre nuestro acristalamiento de unos  $25^\circ$ , no difiere en exceso de la aproximación a *incidencia normal* utilizada en el punto 3.1.1. Por lo que la pérdida por reflexiones acumulada por los dos vidrios viene a aproximarse a un 15%. Sin embargo la incidencia de la radiación en época estival sobrepasa los  $70^\circ$ ,

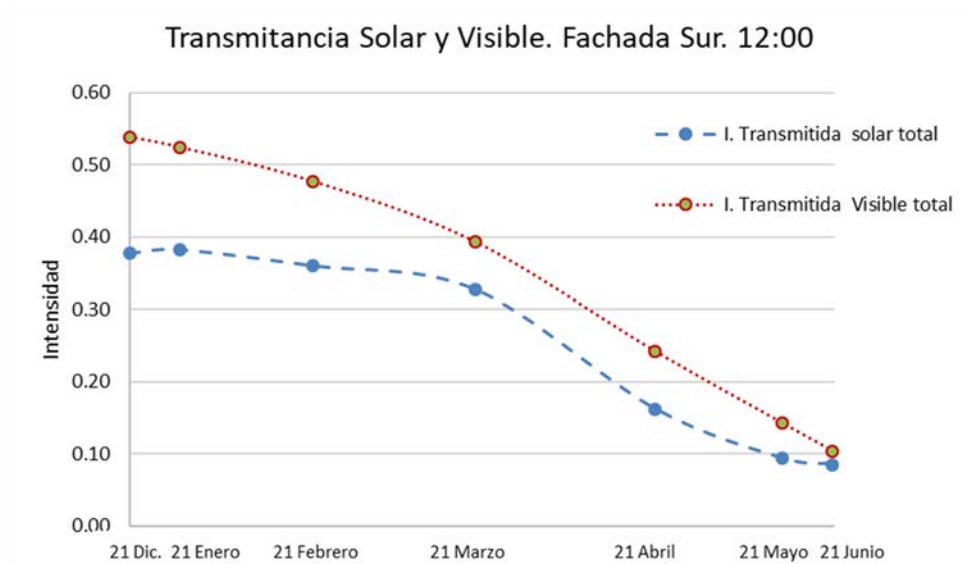
por lo que la disminución de la transmitancia al atravesar los dos vidrios sin el recubrimiento, se vera incrementada notablemente hasta sobrepasar el 50%.

En la Figura 21 representamos la **transmitancia visible total** :



**Fig. 21:** Intensidades en una fachada orientada al sur a las 12 del mediodía desde diciembre a junio. **Transmitancia visible** implementando  $T(\lambda)$ ,  $S(\lambda)$  y  $V(\lambda)$ .

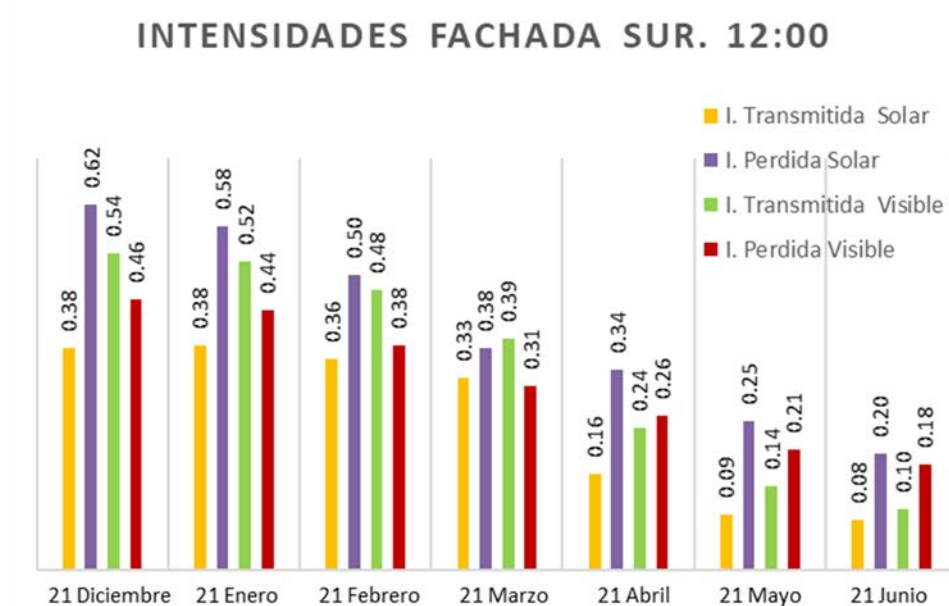
A continuación representamos ambas transmitancias:



**Fig. 22:** Transmitancia solar y Transmitancia visible de nuestro acristalamiento en una fachada orientada al sur a las 12 del mediodía desde diciembre a junio.

En las Figuras 21 y 22 observamos como aplicando este nuevo término aumentamos la transmitancia total a lo largo de la simulación. Esto es coherente con el hecho de que el vidrio con el recubrimiento tiene una transmitancia de 40% del espectro solar, pero del 70% en el visible.

Para finalizar, en la *Figura 23* presentamos las intensidades Transmitidas y perdidas (reflejadas o absorbidas) tanto para el espectro solar como el visible, normalizado para la máxima intensidad en el solsticio de invierno.



*Fig. 23: Porcentajes de intensidad de radiación **solar** y **visible** que atraviesa nuestro acristalamiento y porcentaje de las mismas que no lo atraviesa, en una fachada orientada al sur, a las 12 del mediodía desde diciembre a junio.*

Sería interesante volver a realizar todas las medidas de los anteriores modelos, tanto de la fachada Sur-Oeste, como en la cubierta inclinada. Introduciendo la dependencia espectral de los diferentes elementos del sistema, espectro solar y transmitancia real del vidrio DAG70 propuesto para nuestro recubrimiento.

## 4. Conclusiones y líneas futuras.

Hemos calculado distribuciones de franjas de recubrimiento para acristalamientos en tres diferentes orientaciones que hemos considerado más oportunas: Orientación sur, orientación sur-oeste, y cubiertas inclinadas orientadas al sur.

Los mejores resultados los hemos conseguido en orientaciones sur, tanto para aplicación horizontal como vertical, esto es, para fachadas y cubiertas. Esto se debe a que el modelo teórico se ve modificado por la aparición de la segunda variable de la posición solar, el *Azimet*.

Todo nuestro sistema de optimización se basa en la variable *Altura solar*, y observamos un mejor resultado cuando la variable *Azimet* permanece constante, como sucede en una orientación sur perfecta, donde hemos tomado las 12:00 hora solar. Mientras que, en cualquier otra orientación

interesante para nuestro proyecto, el *Azimet* del sol a la misma hora variara enormemente a lo largo del año, lo que se traduce en una falta de eficiencia de nuestro modelo.

Otro factor que disminuye la eficacia de nuestro modelo, son las dobles y triples reflexiones que hemos explicado con anterioridad. Producen apreciables diferencias respecto al modelo de recubrimiento absorbente en determinados momentos del año, rompiendo con cierta gravedad la linealidad del modelo respecto de la altura solar. En todos los casos supondrá un menor porcentaje de radiación solar tratada por nuestro recubrimiento. Precisamente esta característica hace que no sea relevante si tenemos en cuenta la finalidad del proyecto, ya que ninguna de estas dobles o triples reflexiones afectan al modelo en los meses de verano (exceptuando la claraboya donde siempre dependeremos de la inclinación de la cubierta), cuando maximizar el porcentaje de radiación es más crítico.

Dado que la tendencia hacia el ahorro energético está implementando carpinterías de triple acristalamiento, con doble cámara de aire. Podría adaptarse esta solución de superposición de bandas a estas nuevas carpinterías, aplicando las dos capas a ambos lados del vidrio interior, simplificando la producción del modelo, puesto que se aplicarían las capas en un solo vidrio<sup>12</sup>. O aplicándola en los tres vidrios, dando más libertad al modelo, pero complicando mucho los cálculos, y exponiéndolos a dobles, triples, incluso cuádruples reflexiones. Otra mejora podría ser tener en cuenta las ya mencionadas segundas y terceras reflexiones a la hora de realizar los cálculos.

## Bibliografía

- Casas Peláez, J. (1994). **Óptica**, 7ª edición. Zaragoza.
- CTE-DB, HE. (2013). **Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Ahorro de energía**. BOE.
- CTE-DB, HS. (2016). **Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Salubridad**. BOE.
- González, F.N. (2004). **Arquitectura Bioclimática**. Madrid: Munilla-Lería.
- Manuela Ferrara, Ana Castaldo, Salvatore Esposito, Antonio D'Angelo, Antonio Guglielmo y Alessamdro Antonaia. (2016). **AIN-Ag based low-emission sputtered coatings for high visible transmittance window**. Elsevier. Volume 295, 15 June 2016, Pages 2–7.
- Soroosh Daqiqeh Rezaei, Santiranjan Shannigrahi y Seeram Ramakrishna. (2017). **A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment**. Solar energy Materials and Solar Cells. Volumen 159, Pages 26–51.
- Enrique Carretero Chamarro. (2015). **Estudio de propiedades ópticas, eléctricas y térmicas de recubrimientos decorativos aplicados a cocinas de inducción realizados mediante PVD**. Tesis Doctoral. Capítulo 2. Universidad Zaragoza.

---

<sup>12</sup> Pablo Garrido. Joan Lluís Zamora. José Manuel Marco. Moisés Lostao. 2015. "FB720 project: development of new solar control glazing with passive seasonal discrimination of solar radiation incomes". Springerlink.com. <http://rdcu.be/tubv>.